

電気二重層キャパシタによる電力貯蔵装置

Examination of Energy Storage Systems Using Electric Double Layer Capacitors

○齋藤航平*, 神田和也*

○Kouhei Saitou*, Kazuya Kanda*

*鶴岡工業高等専門学校

*Tsuruoka National College of Technology

キーワード: 電子回路 (electronic circuit), 電気二重層キャパシタ (electric double layer capacitor), DC-DC コンバータ (dc-dc converter), 電力貯蔵装置 (energy storage system)

連絡先: 〒 997-0842 山形県鶴岡市井岡字沢田 104 鶴岡工業高等専門学校 電気電子工学科
神田和也, Tel.: (0235)25-9095, Fax.: (0235)25-9095, E-mail: kanda@tsuruoka-nct.ac.jp

1. はじめに

エネルギー問題が重要視されるなか, 新エネルギーの活用が盛んに行われている. 新エネルギー発電の大きな特徴は発生電圧が不安定な点である. 例えば, 太陽光発電では太陽の日照, 風力発電では風速の変化によって変動する. 加えて, 独立分散型の電源として利用されることが多い. 以上のようなことから, 新エネルギーを利用する場合, 有効活用のため電力貯蔵装置が必要となる. 電力貯蔵装置には高効率, 高出力, 長寿命, 低環境負荷である事が求められているが, こういった要求から電気二重層キャパシタ (以下, EDLC と呼ぶ) を用いた方式が検討されている¹⁾²⁾. EDLC は電解液を挟んだ分極性電極から成り, 両電極と電解液の界面に形成される電気二重層によって電荷を蓄える. 充放電過程は電荷の移動のみ行われるため長寿命で, 急速な充放電が可能である.

また, EDLC は保持している電荷量に応じて電圧が異なる特性を有する. これは従来の二次電池にない特性であり, 残存電荷を容易に求められるメリットがある. しかしながら, 多くの電気機器は入力がある一定の電圧範囲である前提で設計されている. さらに EDLC はできるだけ低電圧まで使用したほうがより多くのエネルギーを利用できるため放電時には電圧低下を保证する必要がある³⁾⁴⁾.

本研究では電力変換効率と稼働時間に着目して放電時の電圧変動を抑制する方式を検討する. 電圧変動を保障するために主に用いられている DC-DC コンバータ (以下, コンバータと呼ぶ) によって変圧する方式と EDLC の直列数を切り替える方式に加えて反転出力型コンバータである Cuk コンバータと EDLC 直列数の切り替えの併用方式について比較するため試作, 試験を行う.

2. 放電時の電圧変動抑制方法

2.1 コンバータ方式

コンバータによって変圧する方式を Fig. 1 に示す。この方式では EDLC から負荷に電力を供給する場合、すべてコンバータを介するために、システムの電力効率はコンバータで決まる。試作したスイッチング制御方式昇圧型コンバータはおよそ 75[%] の効率である。また、稼働時間はコンバータが動作できる最低入力電圧によるところが大きく、EDLC に電荷が残存しているにも関わらず負荷にそれ以上、電力を供給できない問題がある。

2.2 直列数切り替え方式

スイッチによって EDLC の直列数を切り替える方式を Fig. 2 に示す。この方式では負荷に加わる電圧が一定の範囲内になるようスイッチの ON, OFF を制御する。効率に関しては負荷に EDLC が直結するため、線路抵抗と EDLC の内部抵抗を考えなければ 100[%] 近い効率になると考えられる。効率が良いことから稼働時間をコンバータ方式よりも長くできる。この方式ではスイッチが重要になり、半導体リレーもしくは電磁リレーを利用することが考えられる。その違いを Table 1 に示す。半導体リレーでは ON 電圧による電圧降下があり、スイッチング時に電力消費があることから効率を優先させ電磁リレー (以下、リレーと呼ぶ) を用いて構成する。

3. コンバータと直列数の切り替え併用方式

3.1 制御方法

Fig. 3 に示すようにコンバータと直列数の切り替えを併用することで EDLC の全電荷を使い切る動作が可能となる⁵⁾。リレーの切り替えタイミングは直列数を切り替える方式と同様に、

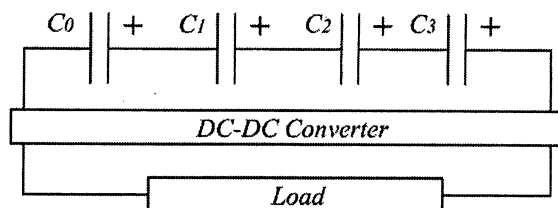


Fig. 1 The method of voltage control with DC-DC converter

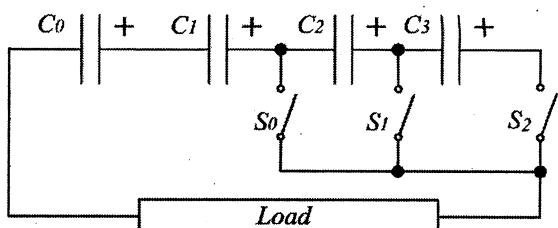


Fig. 2 The method of voltage control with selected switch

Table 1 Characteristics of Electromagnetic Relay(ER) and Solid State Relay (SSR)

	ER	SSR
Voltage drop	○	×
Power consumption	○	×
Life span	×	○
Reliability	×	○

○:good ×:not good

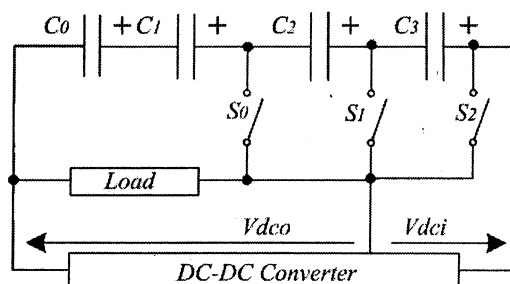


Fig. 3 The method of voltage control with DC-DC converter and selected switch

負荷に加わる電圧を一定の範囲内になるようリレーを ON, OFF する。また、負荷に接続されていない EDLC をコンバータの入力とし、負荷（負荷に接続されている EDLC）に対して出力する。この時、全ての EDLC 電圧が均等に低下していくように適宜、電圧増幅度を変える必要がある。さらに、この回路構成を実現するにはコンバータの出力電圧 V_{dco} は負電圧でなくてはならない。反転出力型コンバータとして Cuk コンバータを使用する。

3.2 Cuk コンバータ

Cuk コンバータの構造を Fig. 4 に示す。昇圧型コンバータの中間部に結合キャパシタ C_4 を加え入出力の直流的接続を遮断し、出力部にインダクタンス L_2 を加えることで出力電圧極性を反転させている。能動スイッチング素子 T が ON の場合、受動スイッチング素子としてのダイオード D 、インダクタンス L_1 と C_4 の関係により L_2 に負電圧が加わり負電流が流れる。また、 T が OFF の場合、同様に D が ON になるため出力には負電圧が出力され続ける。以上のようにスイッチング素子 T に加えるパルス (ON, OFF) によって電圧増幅度 (出力電圧) を変えることができる。 S をスイッチング変数とし、電圧増幅度 A は次式となる。

$$A = \frac{|V_{dco}|}{V_{dci}} = \frac{S}{1-S} \quad (1)$$

設計において直列数切り替えとの併用に適したコンバータを作製する上で、経験を踏まえて仕様を次のように決定する。

- 電圧増幅度は小さいため L_1 と L_2 は等しい
- 出力電流は 1[A]
- 高周波スイッチングパルスは PIC マイコンで生成不可なため 20[kHz] 程度に抑える
- 電流リプル率は 30[%] 程度と仮定する。
- コンバータの効率は 85[%] を目標にする。

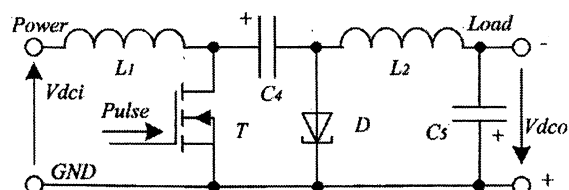


Fig. 4 Composition of Cuk converter

Table 2 Parameters of the Cuk converter

Inductor	L_1	100 μH
	L_2	100 μH
Capacitor	C_4	3 μF
	C_5	1 mF
Switching frequency	f	20 kHz

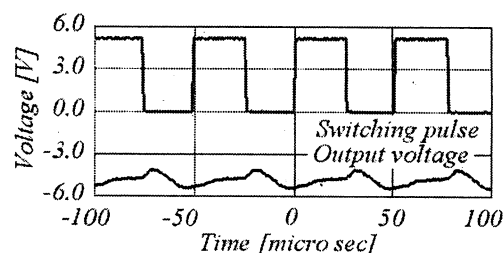


Fig. 5 Output experiment wave forms of Cuk converter

Table 2 に算出した主な回路定数を示す。作製した Cuk コンバータは PIC マイコンで V_{dco} と V_{dci} を監視しつつ、PWM 機能における Duty 比に式 (1) でフィードバックすることにより制御する。Fig. 4 の結合キャパシタ C_4 に静電容量 3[μF] のキャパシタを使用し、平滑キャパシタ C_5 に静電容量 1[mF] のものを使用した際の Cuk コンバータのスイッチング波形と出力電圧を Fig. 5 に示す。出力電圧に大きな変動が見られるが、さらに静電容量の大きい平滑キャパシタを接続すればリプルを吸収できる。なお、Fig. 3 の構成から分かるようにコンバータとスイッチ切り替え併用方式では、スイッチを介し負荷に直接接続されている EDLC が平滑キャパシタの働きをしているため、 C_5 を省略しても平滑することが可能だと考えられる。

4. 実験

4.1 実験環境概要

Fig. 6 に測定系概略図を示す。20[°C] に設定した恒温槽 (Espec 社製, SH-241) 中に充放電切り替えユニット, 1[A] の定電流電子負荷 (HP 社製, 6063B), 測定対象を接続する。充電時には電流源として DC 電源装置 (Agilent 社製, E3634A) を使用し, 電圧, 温度測定にデータ収集ユニット (HP 社製, 34970A), 電流測定に電流センサ (日本ケミコン社製, A25811F), 波形観測にオシロスコープ (KENWOOD 社製, PCS-3200) を用い測定した。電流センサは微小信号用の差動増幅回路であるインスツルメンテーションアンプによって増幅を行っている。充放電切り替え, 電子負荷, 電源装置, データ収集ユニットは PC で制御している。Table 3 に使用した EDLC の諸特性を示す。

4.2 直列数の切り替え方式

Fig. 2 の構成で満充電状態の EDLC を 4 つ使用する。負荷に対し 2.5~5.0[V] の電圧が印加するように PIC マイコンを使いリレーを動作させる。その結果, Fig. 7 が得られた。システムの稼働時間は 3400[sec] だった。全 EDLC 電圧では電荷が残存しているが, このまま放電を続けると C_0, C_1 に対して逆電圧が加わってしまい, EDLC が劣化, 破損する恐れがあるため, これ以上稼働させることはできない。実験終了時の各 EDLC の端子電圧, 残存エネルギーを Table 4 に示す。試験終了時, 電荷を使いきれない EDLC がある。 C_2 に 1.1[kJ], C_3 に 3.1[kJ] ものエネルギーが残っており, 放電に扱えない電荷が存在する事は結果として見かけ上の効率が低下したと考える事ができ, さらに, 稼働時間をより長くする観点からも全電荷を使いきる事が望ましい。

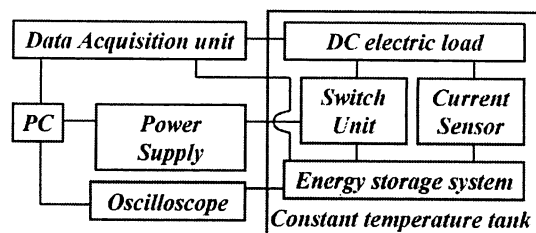


Fig. 6 Measurement system overview

Table 3 Specifications of the EDLC

Model name	DDL2R5LGN142KBF0S
Operating temperature	-25°C to +60°C
Rated Voltage	2.5 V
Capacitance	1400 F $\pm$ 10 %
Internal resistance	2.5 m Ω
Dimensions	ϕ 40 mm $\times$ 150 mm
Weight	280 g

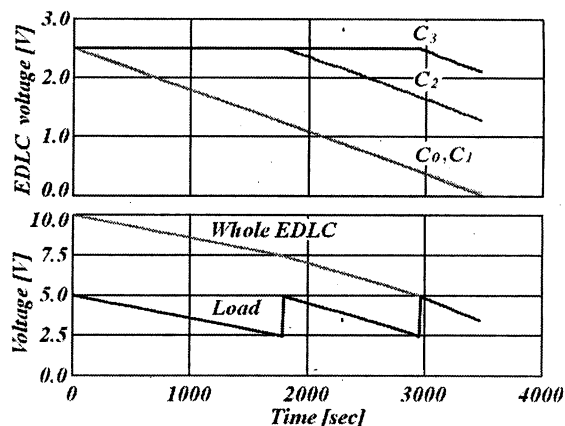


Fig. 7 Discharge characteristics of voltage control with selected switch using a relay as switching device

Table 4 EDLC state at the end of experiment

EDLC No.	Terminal Voltage [V]	Residual energy [J]
C_0	0.05	1.5
C_1	0.02	0.2
C_2	1.28	1146
C_3	2.11	3122

4.3 コンバータと直列数切り替えの併用方式

Fig. 3 の構成で 4.2 の実験と同じ条件で実験した結果が Fig. 8 である。システムの稼働時間は 3800[sec] となり直列数の切り替え方式よりも約 10[%] 長くすることができた。システムの効率 η_{system} [%] は次式で求めることができる。

$$\eta_{system} = \eta_{dc} \times \left(1 - \frac{a}{b}\right) + 100 \times \frac{a}{b} \quad (2)$$

a は負荷直結の EDLC の個数で、 b は全 EDLC の個数、 η_{dc} は Cuk コンバータの効率 [%] である。Cuk コンバータについて別途、特性実験をしたところ、その効率は約 72[%] だったため、式 (2) からコンバータが稼働しているシステムの効率はスイッチの状態により 86~93[%] となる。 S_2 が ON でコンバータが停止している状態ではさらに効率が上昇する。

5. おわりに

実験したコンバータと直列数の切り替え併用方式ではコンバータとリレーの制御が不完全であったため、EDLC 毎の電圧 (電荷の残量) に差異がみられ、負荷に供給される電圧も動作電圧領域を有効に活用しきれていない。加えて、コンバータの効率を上昇させることで、システムの稼働時間と効率を改善することが可能だ。現在研究されているコンバータでは効率 90[%] を超えるものもある。仮に、これを使用し最適な制御を行えば全体平均効率で 95[%] 以上も可能であり、同様の条件で稼働時間はさらに 20[%] 延長させることができる。実験では直列数の切り替えに電磁リレーを用いたが、この挙動に問題がある。Fig. 9 に EDLC の直列数を 1 つから 2 つへ切り替えた時のリレーの電圧挙動を示す。チャタリングが起これ、その前後に電圧が急激に低下している様子がわかる。これはリレーに ON でも OFF でもない中間状態が存在することによる瞬間的な負荷への電力供給の停止、または切り替え状態の組み合わせによる EDLC の

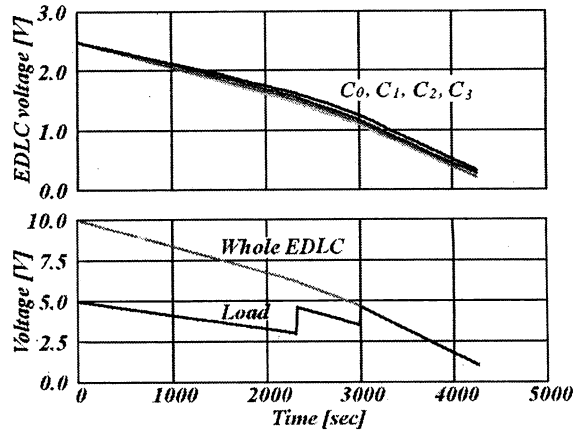


Fig. 8 Discharge characteristics of voltage control with DC-DC converter and selected switch

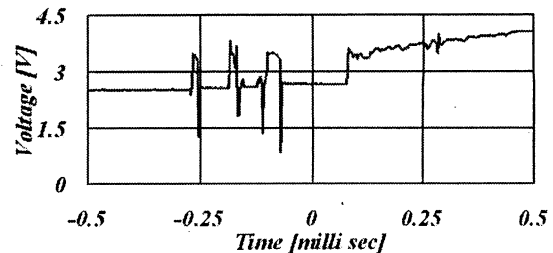


Fig. 9 Electromagnetic relay wave forms at a switching

短絡が発生したものと考えられる。そのため今後は半導体リレーを使用することが好ましいが、その際、ON 電圧による電圧降下や、スイッチング時の電力消費等の問題について検証する必要がある。

参考文献

- 1) 川口博嗣, 黒川浩助, 野崎洋介, 谷内利明: EDLCを組み込んだ独立型太陽光発電システムのシミュレーション, 電子情報通信学会, 100-447, 87/94(2000)
- 2) 三上和正, 小林丈士, 平塚尚一: 電気二重層コンデンサを用いた小電力供給回路の開発, 東京都立産業技術研究所研究報告, 6-8(2003)
- 3) 直井勝彦: キャパシタの現状と展望, ポリマープロンティア 21 講演要旨集, 2006-6, 7/13(2006)
- 4) 岡村勉夫: 電気二重層キャパシタと蓄電システム, 1/231, 日刊工業新聞社 (2001)
- 5) 鶴野将年, 豊田裕之: 電気二重層キャパシタを蓄電源に用いた新しい宇宙機電源システム, 電子情報通信学会技術研究報告, 108-100, 139/143(2008)